

Title No. 115-M48

# Void Detection and Thickness Measurement in Concrete Elements

by Leonel Lipa, Enrique N. Pasquel, Laura M. Navarro, and José Del Álamo

*In this research, a methodology is proposed to detect voids and measure thicknesses in typical concrete specimens in buildings. To develop this methodology, beams and concrete walls with voids represented by expanded polystyrene elements and hollow plastic or cardboard elements were made. Ultrasonic and ultrasonic pulse-echo equipment were used to scan and locate these elements, as well as measure the thickness of the specimens made of concrete. The dimensions of the simulated voids are very close to the length of the ultrasound waves, so post-processing of the data obtained was performed to improve the results of this research.*

**Keywords:** pulse-echo; thickness; ultrasonic; voids.

## INTRODUCTION

In construction, there are poor building processes in which problems arise in the quality of the concrete, which can affect its structural capacity. For example, honeycombing is a common problem due to these poor practices, and depending on their size, may affect the structure and its structural capacity. In many cases, these voids are usually internal so they cannot be seen. To verify the existence of these defects within a concrete structure, the most common method is the taking of drilled core samples; nevertheless, this method is expensive, destructive, and requires the subsequent repair of the holes.<sup>1</sup> Another method is using nondestructive testing (NDT), which consists in a wide group of analysis techniques to evaluate certain properties and conditions of the concrete without deteriorating or destroying the specimen<sup>2</sup>; in this way, a large number of tests can be carried out on the concrete elements subject to defect verification. ACI 228.2R-13<sup>3</sup> summarizes some NDT methods for concrete, such as the ultrasonic pulse velocity (UPV) method and the ultrasonic pulse-echo method for flaw detection. In these methods, locating an internal element or void depends on the wavelength used in each scan.<sup>4</sup> A general rule of thumb is that the discontinuity must be larger than one-half wavelength to have a chance of being detected.<sup>5</sup> In the UPV method, the ultrasonic time of travel is measured between two opposite transducers. Any variation in the propagation speed of stress waves indicates voids, non-uniformity of the material, or damage.<sup>6</sup> However, pulse-echo devices use a combination of piezoelectric transducers, which allow analyzing an element face without having to access the opposite face. The reflection of the waves in flaws or interfaces is measured by the transmitters or other transducers acting as receivers.

The pulse-echo method was studied by Carino et al.,<sup>7</sup> who proposed a technique of transmitter/receiver impact pulse-echo. In 1986, Doctor et al.<sup>8</sup> proposed a synthetic aperture focusing technique (SAFT), which is a post-pro-

cessing signal designed to improve the result of an area scan to locate metal defects. Many studies have been developed using this technique to locate voids in concrete such as Shandiz and Gaydecki<sup>9</sup> and Hosseini et al.<sup>10</sup> However, in 2010, Tong et al.<sup>11</sup> used the Hilbert Huang transform to develop an improved SAFT for flaw detection inside concrete. Later, this new SAFT was used for the location of voids in subsequent investigations such as Cassidy et al.,<sup>12</sup> De La Haza et al.,<sup>13</sup> and Haach and Ramirez.<sup>6</sup> Nevertheless, in these studies, the dimensions of the internal elements that simulate voids were very large, and they are not typical in concrete buildings.

In addition, the pulse-echo method allows evaluating the thickness of a concrete element when there is no access to the opposite face, as in the case of shoes, tunnels, or screen walls. In 2008, Beutel et al.<sup>14</sup> used an ultrasonic pulse-echo device to measure concrete thicknesses between 100 and 300 mm (3.94 and 11.82 in.), from which they obtained a resolution of 10 mm (0.39 in.).

In this study, a methodology is proposed to locate internal voids and to measure thicknesses in the concrete. To carry out the tests that support the proposal, 54 beams and six concrete walls were elaborated with internal elements, which represent voids inside the material.

## RESEARCH SIGNIFICANCE

There are several studies about detecting flaws inside concrete using ultrasonic waves; however, the elements simulating the voids are very large, which are not typical in the thicknesses of concrete buildings. Due to this, in this study, spheres with a diameter of 14 to 50 mm (0.55 to 2 in.) and other small elements were used to simulate voids inside concrete for the eventual flaw detection in the structure.

## SCOPE

Only concrete mixtures with a water-cement ratio ( $w/c$ ) of 0.6 and 0.7 were made, provided that they are the most common type of concrete used in Peru as well as other countries in Latin America. Also, only polystyrene spheres with diameters of 14, 25, and 50 mm (0.55, 1, and 2 in.) were used because they were the only sphere diameters available in the local market near the one-half wavelength of the ultrasonic

*ACI Materials Journal*, V. 115, No. 4, July 2018.

MS No. M-2017-230.R2, doi: 10.14359/51702188, was received August 31, 2017, and reviewed under Institute publication policies. Copyright © 2018, American Concrete Institute. All rights reserved, including the making of copies unless permission is obtained from the copyright proprietors. Pertinent discussion including author's closure, if any, will be published ten months from this journal's date if the discussion is received within four months of the paper's print publication.

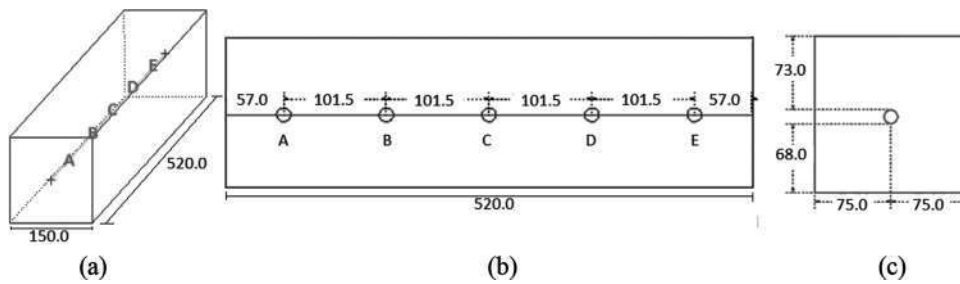


Fig. 1—Beams of 150 x 155 x 520 mm with expanded polystyrene 14 mm in diameter: (a) 3-D view; (b) side view; and (c) cross view. (Note: 1 mm = 0.0394 in.)

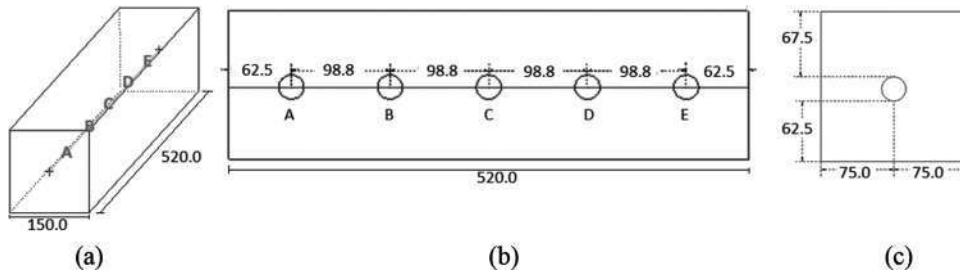


Fig. 2—Beams of 150 x 155 x 520 mm with expanded polystyrene 25 mm in diameter: (a) 3-D view; (b) side view; and (c) cross view. (Note: 1 mm = 0.0394 in.)

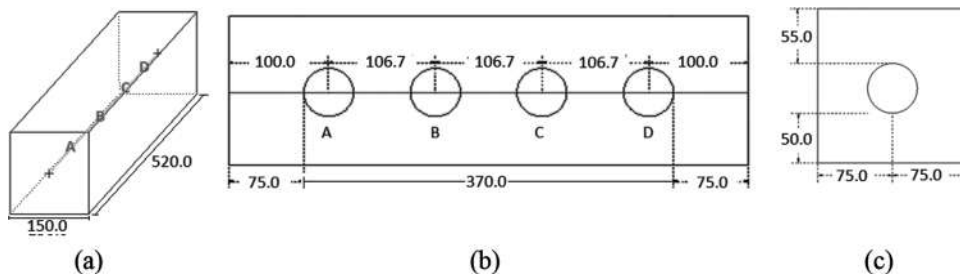


Fig. 3—Beams of 150 x 155 x 520 mm with expanded polystyrene 50 mm in diameter: (a) 3-D view; (b) side view; and (c) cross view. (Note: 1 mm = 0.0394 in.)

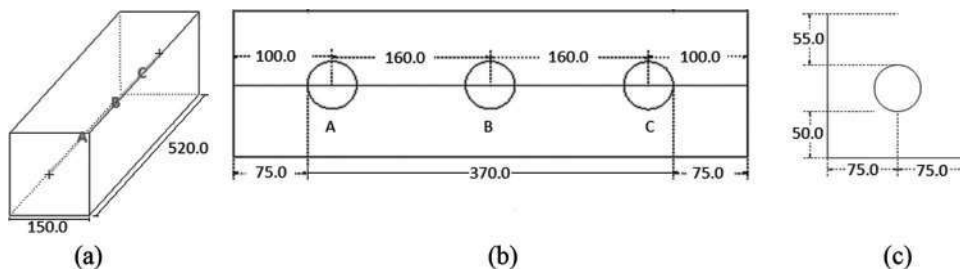


Fig. 4—Beams of 150 x 155 x 520 mm with expanded polystyrene 50 mm in diameter: (a) 3-D view; (b) side view; and (c) cross view. (Note: 1 mm = 0.0394 in.)

devices. The study parameters were selected according to available resources.

### EXPERIMENTAL WORK

Forty-eight standard beams of 150 x 155 x 520 mm (5.91 x 6.11 x 20.49 in.) and six prismatic walls of 500 x 500 x 250 mm (19.70 x 19.70 x 9.85 in.) were elaborated according to ASTM C192,<sup>15</sup> which were stored in a curing room for 28 days (ASTM C511<sup>16</sup>). The beams were made with expanded polystyrene spheres with diameters of 14, 25, and 50 mm (0.55, 1, and 2 in.), which were inserted

with different distribution (refer to Fig. 1 through 4). For the walls, three models were designed. The first model contained a prism of 300 x 50 x 50 mm (11.82 x 2 x 2 in.) of expanded polystyrene, two hollow spheres of 70 mm (2.76 in.) in diameter and a plastic bottle 50 mm (2 in.) in diameter and 240 mm (9.46 in.) high. The second model contained a hollow circular cylinder of paperboard 75 mm (3 in.) in diameter and 230 mm (9 in.) in height, two cubes of expanded polystyrene of 50 mm (2.00 in.), and a prism of 150 x 50 x 50 mm (5.91 x 2.00 x 2.00 in.) of expanded polystyrene. The last model contained a 50 mm (2 in.) PVC

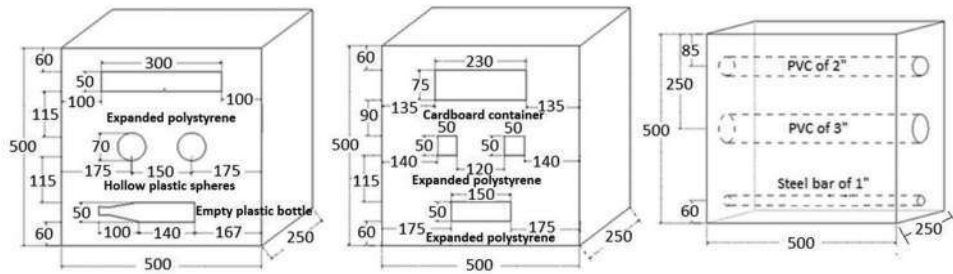


Fig. 5—Walls of 500 x 500 x 250 mm: (a) Model 1; (b) Model 2; and (c) Model 3. (Note: 1 mm = 0.0394 in.)

tube and a 75 mm (3 in.) diameter tube as well as a 25 mm (1 in.) diameter corrugated steel bar (refer to Fig. 5).

### Materials

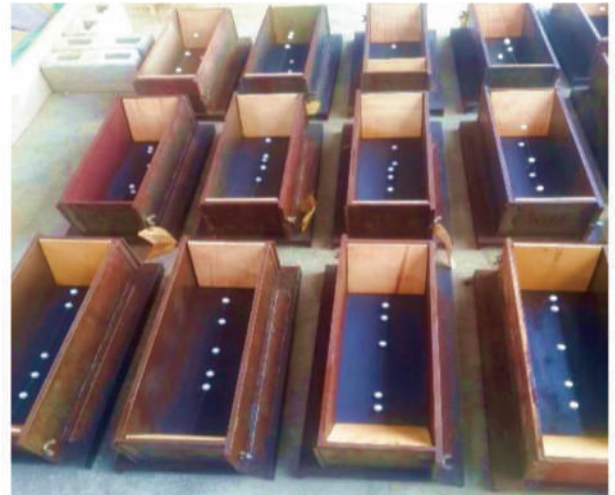
Ordinary portland cement Type I was used according to ASTM C150.<sup>17</sup> This cement has a specific weight of 3110 kg/m<sup>3</sup> (194 lb/yd<sup>3</sup>); the fine aggregate has a fineness modulus of 3.03 and a specific weight of 2620 kg/m<sup>3</sup> (164 lb/yd<sup>3</sup>); and the coarse aggregate has a maximum size of 19.05 mm (3/4 in.) and a specific weight of 2670 kg/m<sup>3</sup> (167 lb/yd<sup>3</sup>). In addition, used a high-range water-reducing admixture (HRWRA).

### Concrete characteristics

The beams were made of concrete with a *w/c* of 0.7 (refer to Fig. 6). The walls, two for each of the three models, were also made of concrete, with a *w/c* of 0.6 in the first wall and 0.7 in the second wall (Fig. 7). The slump was controlled between 100 and 150 mm (4 and 6 in.) and the air content was between 1 and 3%. All specimens were tested with ultrasonic and ultrasonic pulse-echo waves at an age greater than 28 days.

### Equipment

Two ultrasonic devices were used for detecting flaws. One is a UPV device with two longitudinal wave transducers (P-wave) of 54 kHz frequency. To perform a scan with this equipment by “direct transmission,” access is required to the two opposite sides of the specimen under analysis. The other device is an ultrasonic pulse-echo device with 18 transversal-wave transducers (S-wave) of 50 kHz frequency. This equipment allows performing an area scan, in a strip, in an element. The equipment has a width of 110 mm (4.33 in.), which is why a scanned strip has approximately this same width. To perform an area scan, partial scans are necessary over the length of the strip (the operator defines the distance between two partial scans). It is important to say that, while this distance is smaller, the quality of the scan is better. The width of the scanned strip is averaged over a central longitudinal line, so the result of the area scan will be the longitudinal axis of the strip versus the depth of the scanned element. In addition, when scanning an edge-to-edge strip in a specimen, the initial and final 80 mm (3.15 in.) of the total strip are out of range because the equipment has a length of 160 mm (6.30 in.) and the scans are always averaged in the central part of the device. It is unlikely to find an element or void close to the edges because it is out of the equipment’s range (refer to Fig. 8). Finally, provided



a) Formwork of the beams



b) Concrete beams

Fig. 6—Beams elaborated.

that the distance between emitters and receivers is known, the equipment allows estimation of the wave velocity in a specimen through its transducers using surface waves.

### Void size

The element sizes were chosen because they are very close to the one-half wavelength of the equipment used. The velocity of the ultrasonic waves (P-wave) in the elaborated elements was approximately 4000 m/s (157,600 in./s), having a wavelength of 74 mm (2.91 in.). Therefore, there is a greater probability of locating voids larger than 37 mm (1.46 in.).

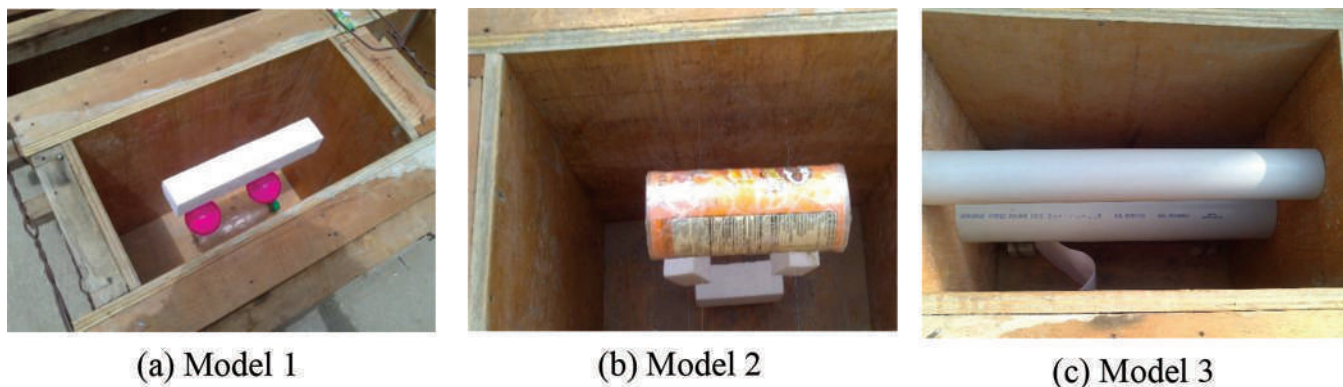


Fig 7—Walls elaborated: (a) Model 1; (b) Model 2; and (c) Model 3.

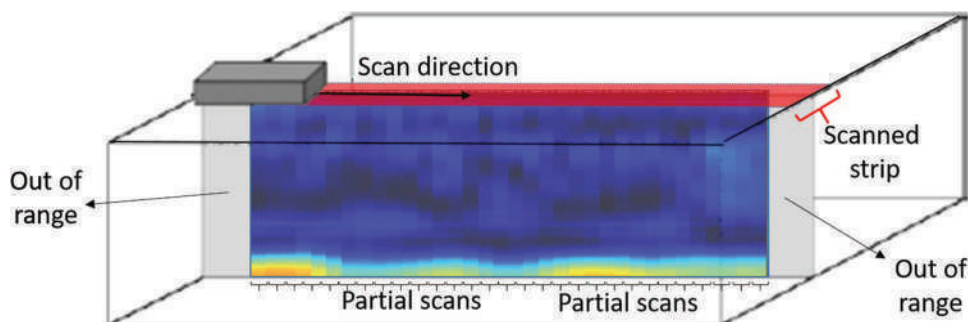


Fig. 8—Scan with pulse-echo ultrasonic.

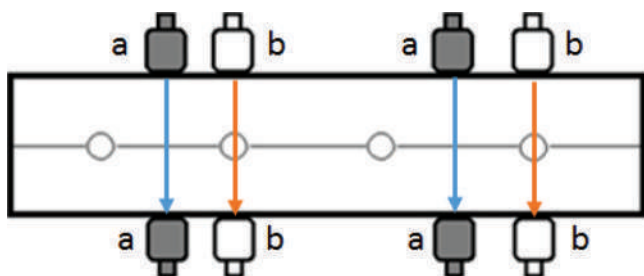


Fig. 9—UPV direct transmission: (a) pure concrete zone; and (b) internal element zone.

On the other hand, the velocity of the ultrasonic pulse-echo waves (S-wave) was 2100 m/s (827,400 in./s), which has a wavelength of 42 mm (1.65 in.). Therefore, there is a greater probability of locating voids greater than 21 mm (0.83 in.).

### Scan procedure

**Thickness measurement**—To measure the thickness of the concrete specimens, the velocity of the ultrasonic waves using the ultrasonic pulse-echo equipment in each specimen, was estimated first. Then, the S-waves were emitted and, finally, the thickness was measured by the waves' time arrival.

**Detection of internal elements**—The method used in scanning with ultrasound equipment in the beams and walls, was of “direct transmission”. Concrete specimens were scanned in areas where the internal elements were located and in areas where it was known that the wave transmission was only in solid concrete (refer to Fig. 9). For the beams, the width and height were scanned, but for the walls, only the thickness of 250 mm (9.85 in.). Approximately five scans were performed on each internal element and five scans on the solid concrete

zones using the ASTM C597 scanning procedure.<sup>18</sup> Detection of an element or void was considered when the velocity in the internal element zone was less than the velocity in a pure concrete zone at 2% (taken as reference).

The beams and walls were also scanned with the pulse-echo ultrasonic equipment from edge to edge. To obtain better results, the partial scan length used was of 5 mm (0.2 in.). For the beams, the four longitudinal faces were scanned in the intermediate zone of the beams, and for the walls, each face of 500 x 500 mm (19.7 x 19.7 in.)—A and B—was divided into four horizontal strips and four vertical strips to scan (refer to Fig. 10).

## EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

### Compressive strength

Compressive strength was determined from cylindrical specimens according to ASTM C39.<sup>19</sup> For a  $w/c$  of 0.7, 277.3 kg/cm<sup>2</sup> (3.94 ksi) was obtained with a standard deviation of 15.2 kg/cm<sup>2</sup> (0.22 ksi); for a  $w/c$  of 0.6, 357.4 kg/cm<sup>2</sup> (5.08 ksi) was obtained with a standard deviation of 17.0 kg/cm<sup>2</sup> (0.24 ksi).

### P-wave and S-wave velocity

Table 1 shows the average, standard deviation, and coefficient of variation of the P- and S-waves in the beams. In the walls, only the average wave velocity was calculated (the standard deviation and the coefficient of variation were not calculated, given the quantity was not statistically representative).

### Thickness measurement with pulse-echo ultrasonic

In the 48 beams, thickness was measured in the dimensions of 150 and 155 mm (5.91 and 6.11 in.), and in the

**Table 1—Ultrasonic wave velocity**

	Ultrasonic pulse P-wave (54 kHz)			Ultrasonic pulse-echo S-wave (50 kHz)		
	Velocity, m/s ( $\times 10^3$ in./s)	Standard deviation, m/s ( $\times 10^3$ in./s)	Variation coefficient, %	Velocity, m/s ( $\times 10^3$ in./s)	Standard deviation, m/s ( $\times 10^3$ in./s)	Variation coefficient, %
48 beams ( $w/c = 0.7$ )	4051 (159.61)	58 (2.29)	1.91	2232 (87.94)	46 (1.81)	2.08
Three walls ( $w/c = 0.7$ )	4153 (163.63)	—	—	2177 (85.77)	—	—
Three walls ( $w/c = 0.6$ )	4267 (168.12)	—	—	2165 (85.30)	—	—

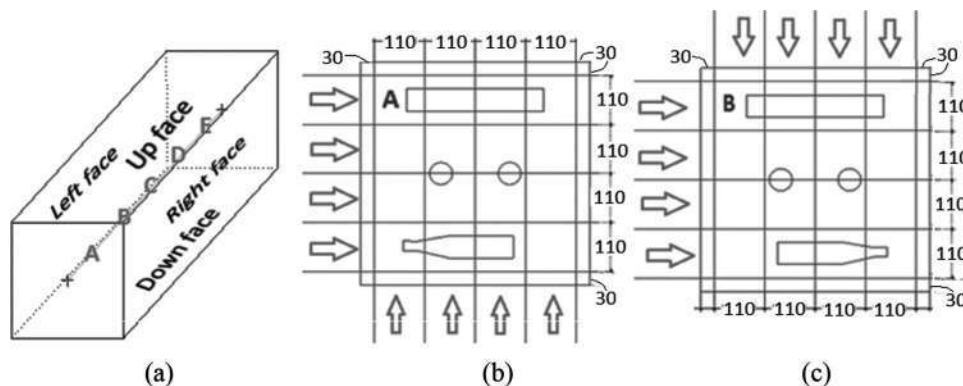


Fig. 10—Faces analyzed with pulse-echo ultrasonic: (a) four faces analyzed in beam; (b) directions analyzed in Face A; and (c) directions analyzed in Face B. (Note: 1 mm = 0.0394 in.)

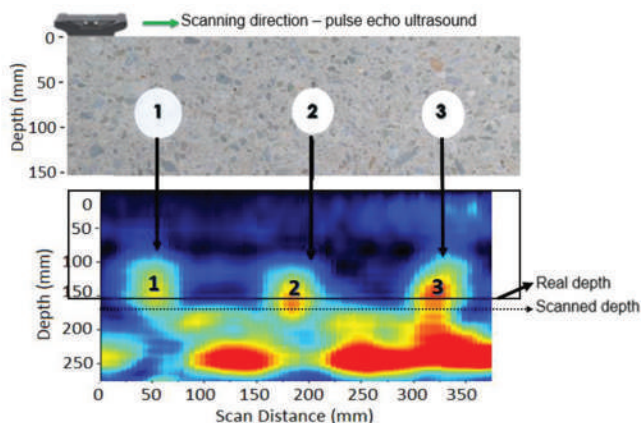


Fig. 11—Concrete thickness scan. (Note: 1 mm = 0.0394 in.)

walls, the dimension of 250 mm (9.85 in.), with an accuracy of 1 mm (0.09 in.) (Fig. 11). The velocity of the S-wave was estimated in each specimen to obtain the thickness of the element in each scan. Table 2 shows the average error and the standard deviation, in percentage, from all scans when comparing the scanned thickness versus its real thickness measured with a Vernier caliper.

**Elements found with UPV (54 KHz—P-wave)**

The one-half wavelength is approximately 37 mm (1.46 in.) for a velocity of 4000 m/s (157,600 in./s) (UPV); however, some expanded polystyrene spheres of 25 and 50 mm (1 and 2 in.) diameter could be found (refer to Table 3).

In the case of the walls, the internal elements were greater size; therefore, most of them were located. Some expanded polystyrene cubes and steel bars were not found (refer to Table 4).

**Elements found with pulse-echo ultrasonic (50 KHz—S-wave)**

Here, given transversal waves were used, the wave propagation velocity was slower in concrete. The one-half wavelength is approximately 21 mm (0.83 in.) for a velocity of 2100 m/s (82,677 in./s); therefore, smaller elements in the beams could be located, which were not perceived by the longitudinal waves of the ultrasound equipment (refer to Table 5). All the beams were cut in half longitudinally to measure the error between the real position and the scanned position of each inserted element. The maximum longitudinal error found was 43 mm (1.69 in.).

In the walls, most of the internal elements could be located; however, in some scans, the complete length of long elements could not be detected (refer to Fig. 12 and Table 6). Finally, the steel bars were very close to the edge, so they were out of the pulse-echo ultrasonic range, but they rarely appeared in the scans (refer to Fig. 13).

**Maximum error found in void location (50 KHz—S-wave)**

Table 7 shows the maximum error found longitudinally and in depth when locating voids in a scanned strip.

**METHODOLOGY TO SCAN REINFORCED CONCRETE ELEMENTS**

From the results, it is recommended to perform scans in reinforced concrete elements with the following procedure. First, the use of a profometer is necessary to locate the position of the longitudinal and vertical steel bars of each strip. Second, the wave velocity of the pulse-echo ultrasonic must be estimated in the material analyzed. Finally, the element must be scanned with the pulse-echo ultrasonic equipment in strips.

**Table 2—Thickness measurement**

	Beams	Walls	Walls
	(192 data) (w/c = 0.7)	(44 data) (w/c = 0.7)	(44 data) (w/c = 0.6)
Average error found, %	3.91	-3.90	<b>-5.80</b>
Standard deviation, %	<b>3.69</b>	2.60	3.21

**Table 3—Spheres found (UPV)—beams**

Diameter of spheres, mm (in.)	Spheres found	Spheres not found	Grade of reliability, %
14 (0.55)	0	36	0.00
25 (1)	3	33	8.33
50 (2)	20	4	83.33

**Table 4—Elements found (UPV)—walls**

	Found	Not found
Polystyrene bar (50 x 50 x 300 mm [2 x 2 x 11.82 in.])	6	0
Plastic sphere (φ70 mm [φ2.76 in.])	1	3
Plastic bottle (240 x φ50 mm [9.46 x φ2.76 in.])	4	0
Cardboard container (230 x φ70 mm [9.06 x φ2.76 in.])	6	0
Cube of polystyrene (50 mm [2 in.])	2	4
Polystyrene bar (50 x 50 x 150 mm [2 x 2 x 5.91 in.])	5	1
PVC tube (φ50 mm [φ2 in.])	6	0
PVC tube (φ75 mm [φ3 in.])	6	0
Steel bar (φ25 mm [φ1 in.])	0	6

**Table 5—Spheres found with pulse-echo ultrasonic—beams**

Diameter of spheres, mm (in.)	Spheres found	Spheres not found	Grade of reliability, %
14 (0.55)	22	176	<b>11.11</b>
25 (1)	118	80	<b>59.60</b>
50 (2)	112	24	<b>82.35</b>

**Table 6—Elements found with pulse-echo ultrasonic—walls**

	Found	Not found	Commentary
Polystyrene bar (50 x 50 x 300 mm [2 x 2 x 11.82 in.])	4	0	Two of them were not located at their complete length (50% lost).
Plastic sphere (φ70 mm [φ2.76 in.])	10	0	All spheres were found.
Plastic bottle (240 x φ50 mm [9.46 x φ2 in.])	4	1	It was not possible to find bottle on one wall face.
Cardboard container (230 x φ70 mm [9.06 x φ2.76 in.])	10	0	All cardboards were found.
Cube of polystyrene (50 mm [2 in.])	7	3	It was not possible to find cubes on one wall.
Polystyrene bar (50 x 50 x 150 mm [2 x 2 x 5.91 in.])	4	0	All bars were found.
PVC tube (φ50 mm [φ2 in.])	4	0	PVC tube was found.
PVC tube (φ75 mm [φ3 in.])	4	0	PVC tube was found.
Steel bar (φ25 mm [φ1 in.])	—	—	Out of ultrasonic range.

In the case of a flaw detection in an area scan (void or internal element), verification with the profometer is needed to verify that it is not a steel bar. If there is access to the two opposing faces of the element, the area in dispute should be scanned with the UPV method (direct method). To do this, the exact location of the flaw must be marked, and then scans performed within a radius of 50 mm (2 in.) of the part in question. The variation of the transfer time in the zone of controversy versus the areas of solid concrete will indicate if there is any void or element inside the analyzed material. If there is no access to the opposite face, a scan with pulse-echo ultrasonic equipment must be performed in a strip perpendicular to the strip analyzed in the zone of the flaw.

On the other hand, to estimate the thickness of a concrete element, the wave velocity of the pulse-echo ultrasonic must be estimated in the material. If internal elements or voids are not detected in the interior, the thickness of the element will be estimated with a maximum error of 6% and a standard deviation of 4%. Keep in mind that if there are internal voids, the value obtained will not be reliable.

## CONCLUSIONS

Independently, both devices give a greater than an 80% chance to find an element or void inside concrete when it is greater than 50 mm (2 in.). Therefore, to have better probability for the detection of flaws inside concrete, these must be greater than one-half of the wavelength. However, using only conventional P-wave ultrasound equipment is not a good choice for detecting flaws, because the operator takes too much time to scan a concrete specimen at every point at small distances, and it requires access to both opposing faces. However, with the pulse-echo ultrasonic equipment, large areas can be scanned to find voids or elements within concrete, but the exact location of these specimens is not accurate in contrast to the scans made on the elaborated specimens. The maximum longitudinal error found was 43 mm (1.69 in.). Also, sometimes, the steel bars inside concrete were detected and appeared on the area scans.

The pulse-echo ultrasonic equipment determined the thickness of a concrete element with an error of 3.91% in the beams and 5.81% in the walls. In this way, it is concluded that the maximum error in thickness measurement with pulse-echo ultrasonic equipment of a concrete element, consisting of 150 to 250 mm (5.91 to 9.85 in.), can be 5.81% with a standard devi-

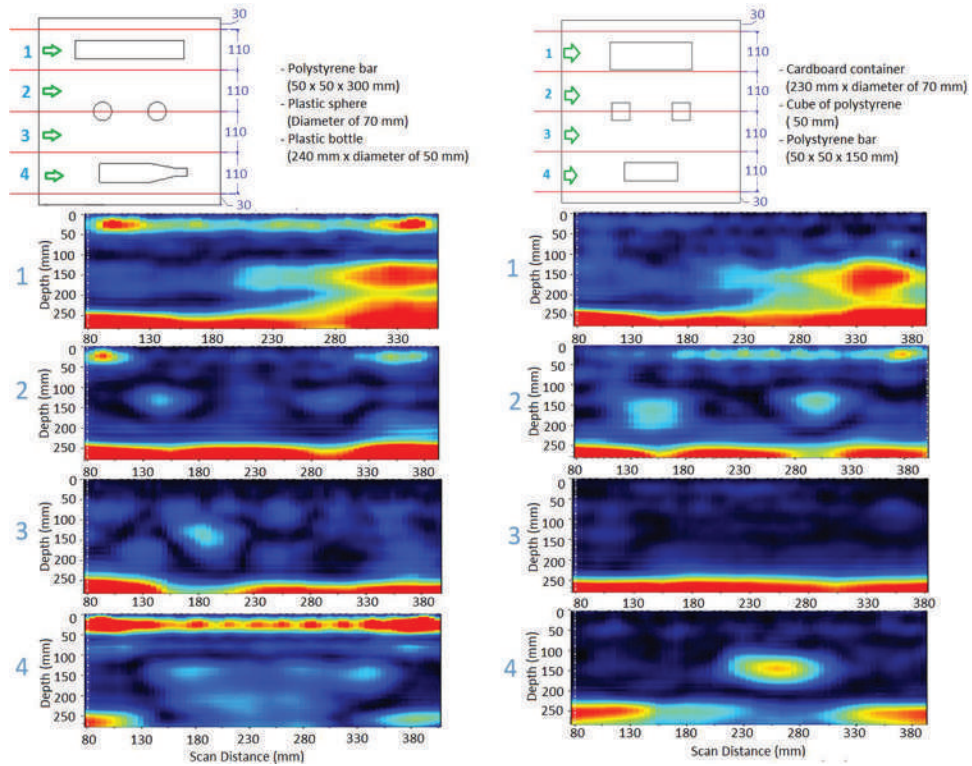


Fig. 12—Scans using pulse-echo equipment in wall Models 1 and 2. (Note: 1 mm = 0.0394 in.)

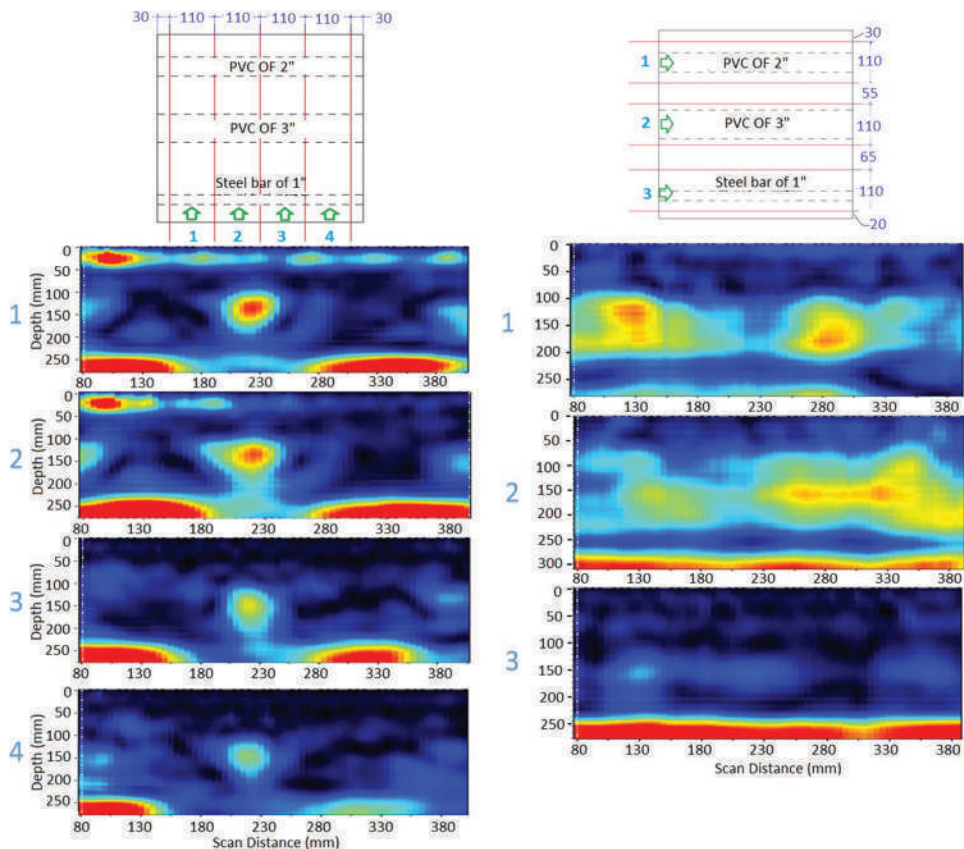


Fig. 13—Scans made using pulse-echo ultrasonic equipment in wall Model 3. (Note: 1 mm = 0.0394 in.)

ation of 3.69% from the real measurement. From these results, it is possible to see and say that the error is not zero because, initially, the ultrasound velocity had been estimated by surface waves (transmitters and receivers of the equipment on a single

face); however, even with this error, the thickness estimation is very close to the actual value. Also, this device can be used to measure asphalt, wood, steel, and other elements.

**Table 7—Maximum error in void location**

	Max. longitudinal error found, mm (in.)	Max. depth error found, mm (in.)
Sphere of polystyrene—14 mm (0.55 in.)	43 (1.7)	*
Sphere of polystyrene—25 mm (1 in.)	40 (1.6)	*
Sphere of polystyrene—50 mm (2 in.)	33 (1.3)	*
Polystyrene bar (50 x 50 x 300 mm [2 x 2 x 11.82 in.])	†	23 (0.9)
Polystyrene bar (50 x 50 x 150 mm [2 x 2 x 5.91 in.])	†	13 (0.5)
Cardboard container (230 x $\phi$ 70 mm [9.06 x $\phi$ 2.76 in.])	†	20 (0.8)
Plastic bottle (240 x $\phi$ 50 mm [9.46 x $\phi$ 2 in.])	†	20 (0.8)
Cube of polystyrene (50 mm [2 in.])	35 (1.4)	37 (1.5)
Plastic sphere ( $\phi$ 70 mm [ $\phi$ 2.76 in.])	33 (1.3)	44 (1.7)
PVC tube ( $\phi$ 50 mm [ $\phi$ 2 in.])	31 (1.2)	24 (1.0)
PVC tube ( $\phi$ 75 mm [ $\phi$ 3 in.])	5 (0.2)	23 (0.9)

\*In beams, many errors were obtained in measurement of depth of spheres because ultrasound waves bounced many times on lateral sides of beam. Width was almost same measure as depth, which made results inaccurate.

†In walls, length of some long elements was not located entirely (horizontal scans). In addition, when vertical scans were performed, some elements were very close to edge, so they were out of equipment range.

Finally, it is concluded that nondestructive tests are not completely effective in a concrete element, so that in a concrete element, there may be internal voids and the equipment may not detect them. For complete safety, it is necessary to take off cores from the element analyzed.

### AUTHOR BIOS

**Leonel Lipa** is a Researcher of the Pontifical Catholic University of Peru (PUCP), Lima, Peru. His research interests include construction materials and nondestructive testing of concrete elements.

ACI Honorary Member **Enrique N. Pasquel** is a Research Engineer of the PUCP in construction materials. He was awarded ACI's Henry C. Turner's Medal in 2006 and the Chapter Activities Award in 2007 for his work in the Peru Chapter – ACI.

**Laura M. Navarro** is a Researcher at PUCP and Head of the construction and materials area of the Laboratory of Earthquake Structures. She received her MS in structural engineering from PUCP. Her research interests include construction materials and nondestructive testing of concrete elements.

**José Del Álamo** is a Researcher at PUCP. His research interests include construction materials and construction engineering.

### ACKNOWLEDGMENTS

The Laboratory of Structures at the Pontifical Catholic University of Peru conducted all the essays. UNICON, Concretmix, and Quimica Suiza also supported it with aggregates, cement, and concrete additives.

### REFERENCES

- Carino, N. J., and Sansalone, M., "Pulse-Echo Method for Flaw Detection in Concrete," *Final Report*, Center for Building Technology, National Bureau of Standards, Washington, DC, 1984.
- Hoła, J., and Schabowicz, K., "State-of-the-Art Nondestructive Methods for Diagnostic Testing of Building Structures – Anticipated Development Trends," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, V. 10, V. 3, 2010, pp. 5-18.
- ACI Committee 228, "Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures (ACI 228.2R-13)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2013, 82 pp.
- Malhotra, V. M., and Carino, N. J., *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, second edition, CRC Press, Boca Raton, FL, 2004, 384 pp.
- Martin, T., "Ultrasonic Testing on EUROFER Welded Joints for Determination of the Minimum Detectable Flaw Size," *KIT Scientific Reports 7543*, 2010, pp. 1-2.

- Haach, V. G., and Ramirez, F. C., "Qualitative Assessment of Concrete by Ultrasound Tomography," *Construction and Building Materials*, V. 119, 2016, pp. 61-70. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.056

- Carino, N. J., "Laboratory Study of Flaw Detection in Concrete by the Pulse-Echo Method," *In-Situ/Nondestructive Testing of Concrete*, SP-82, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1984, pp. 557-580.

- Doctor, S. R.; Hall, T. E.; and Reid, L. D., "SAFT — The Evolution of a Signal Processing Technology for Ultrasonic Testing," *NDT&E International*, V. 19, No. 3, 1986, pp. 163-167. doi: 10.1016/0308-9126(86)90105-7

- Shandiz, H. T., and Gaydecki, P. A., "An Enhanced, High-Speed Ultrasonic SAFT System for Imaging of Defects within Concrete Structures," *AIP Conference Proceedings*, V. 557, No.1, 2001, pp. 703-709.

- Hosseini, Z.; Momayez, M.; Hassani, F.; and Lévesque, D., "Detection of Inclined Cracks inside Concrete Structures by Ultrasonic SAFT," *AIP Conference Proceedings*, V. 975, No. 1, 2008, pp. 1298-1304.

- Tong, J. H.; Chiu, C. L.; and Wang, C. Y., "Improved Synthetic Aperture Focusing Technique by Hilbert-Huang Transform for Imaging Defects inside a Concrete Structure," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, V. 57, No. 11, 2010, pp. 2512-2521.

- Cassidy, N. J.; Eddies, R.; and Dods, S., "Void Detection beneath Reinforced Concrete Sections: The Practical Application of Ground-Penetrating Radar and Ultrasonic Techniques," *Journal of Applied Geophysics*, V. 74, No. 4, 2011, pp. 263-276. doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.06.003

- De La Haza, A. O.; Samokrutov, A. A.; and Samokrutov, P. A., "Assessment of Concrete Structures Using the Mira and Eyecon Ultrasonic Shear Wave Devices and the SAFT-C Image Reconstruction Technique," *Construction and Building Materials*, V. 38, 2013, pp. 1276-1291. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.002

- Beutel, R.; Reinhardt, H. W.; Grosse, C. U.; Glaubitt, A.; Krause, M.; Maierhofer, C.; Algernon, D.; Wiggenshauser, H.; and Schickert, M., "Comparative Performance Tests and Validation of NDT Methods for Concrete Testing," *Journal of Nondestructive Evaluation*, V. 27, No. 1-3, 2008, pp. 59-65. doi: 10.1007/s10921-008-0037-1

- ASTM C192/C192M-16a, "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, 8 pp.

- ASTM C511-13, "Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, 3 pp.

- ASTM C150/C150M-16e1, "Standard Specification for Portland Cement," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, 10 pp.

- ASTM C597-16, "Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, 4 pp.

- ASTM C39/C39M-17b, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, 8 pp.



# Detección de vacíos y medición del espesor en elementos de concreto mediante el pulso ultrasónico

Leonel Lipa<sup>(a)</sup>, Enrique N. Pasquel<sup>(b)</sup>, Laura M. Navarro<sup>(c)</sup>, José Del Álamo<sup>(d)</sup>

Laboratorio de Estructuras Antisísmicas, Pontificia Universidad Católica del Perú; Lima, Perú

<sup>(a)</sup>leonel.lipa@pucp.pe, <sup>(b)</sup>epasquel@controlmixexpress.com, <sup>(c)</sup>lnavarro@pucp.edu.pe, <sup>(d)</sup>j.delalamoc@gmail.com

## RESUMEN

En esta investigación se desarrolló una metodología para detectar vacíos y medir espesores en especímenes de concreto típicos en edificaciones. Para el desarrollo de esta metodología, se elaboraron vigas y muros de concreto con vacíos representados por elementos de poliestireno expandido y elementos huecos de plástico o cartón. Se utilizaron equipos de ultrasonido y pulso eco ultrasónico para escanear y detectar estos elementos internos; y para medir el espesor de los especímenes de concreto elaborados. Las dimensiones de los vacíos simulados son muy cercanas a la longitud de las ondas de ultrasonido, por lo que se realizó un post procesamiento de los datos con el fin de mejorar los resultados.

Palabras clave

Ultrasonido, concreto, espesor, pulso eco, vacíos.

## INTRODUCCIÓN

En construcción, existen prácticas arraigadas y/o procesos constructivos deficientes en las que se producen problemas en la calidad del concreto que pueden afectar la capacidad de una estructura. Algunos problemas frecuentes producto de estas prácticas suelen ser las cangrejeras, y dependiendo de su tamaño pueden causar una disminución considerable de las propiedades del concreto. En algunas ocasiones estos vacíos suelen ser internos por lo que no se aprecian a simple vista. Una manera de ubicar la existencia de estos defectos es por medio de la extracción de núcleos de concreto, sin embargo, este método es caro, destructivo y requiere que se reparen los huecos ocasionados por la extracción [1]. Otra forma de detectar estos vacíos en el concreto es por medio de ensayos no destructivos (NDT por sus siglas en inglés). Estos consisten en un amplio grupo de técnicas de análisis para determinar algunas propiedades y condiciones del concreto sin deteriorarlo ni destruirlo [2], por lo tanto, es posible realizar numerosas pruebas en los elementos analizados. El ACI 228.2R-13 [3] resume algunos NDT para el concreto tales como el método de la velocidad del pulso ultrasónico (UPV por sus siglas en inglés) y el método del pulso eco ultrasónico para detectar vacíos internos. En estos métodos, localizar un vacío o elemento interno depende directamente de la longitud de onda usada en cada escaneo [4]. Una regla general es que, si se quiere tener una probabilidad razonable de detectar discontinuidades, estas deben ser mayores a la mitad de la longitud de onda [5]. En el método UPV, se utilizan dos transductores, un emisor y un receptor, para medir el tiempo de viaje de las ondas ultrasónicas. Para realizar un escaneo de UPV adecuado, es necesario que el elemento en cuestión tenga acceso a dos caras opuestas para colocar los dos transductores. Cualquier variación en la propagación de la velocidad de la onda indica la presencia de huecos internos, no uniformidad del material o daños internos [6]. Por otro lado, los equipos pulso eco ultrasónicos poseen una serie de transductores piezoeléctricos, los cuales permiten el análisis de una sola cara de un elemento sin necesidad de tener acceso a la cara posterior. Este equipo también mide el tiempo de vuelo de las ondas, pero de ida y vuelta (en forma de ecos). Si las ondas regresan en menor tiempo, esto nos indica que existe la probabilidad de que existan elementos internos o huecos en el elemento analizado.

El pulso eco fue estudiado por Carino et al. [7] quienes desarrollaron una técnica de transmisor/receptor pulso eco de impacto. En 1986, Doctor et al. [8] plantearon una técnica de apertura sintética de enfoque (SAFT por sus siglas en inglés), el cual es un procesamiento de señal diseñado con el propósito de optimizar el resultado de un escaneo de área al localizar defectos en metales. Investigaciones tales como las de Shandiz et al. [9] y Hosseini et al. [10] utilizaron esta técnica para localizar vacíos ya en concreto. En el año 2010, Tong et al. [11] utilizaron la transformada de Hilbert Huang con el fin de perfeccionar la técnica SAFT en la detección de vacíos dentro del concreto. Esta nueva técnica fue utilizada en investigaciones posteriores tales como las de Cassidy et al. [12] y De La Haza et al. [13]. Por último, en el año 2016, Haach y Ramirez [6] propusieron la técnica de reconstrucción iterativa simultánea (SIRT por sus siglas en inglés) para detectar elementos cilíndricos dentro del

concreto. Para utilizar esta técnica es necesario únicamente dos transductores (emisor y receptor), sin embargo, numerosos escaneos son necesarios para obtener imágenes aceptables.

También, el método de pulso eco ultrasónico permite estimar el espesor de elementos de concreto cuando no se tiene acceso a la cara opuesta de este (como en el caso de zapatas, túneles o muros pantalla). En el año 2008, Beutel et al. [14] utilizaron un equipo pulso eco ultrasónico con el fin de medir espesores en concreto entre 100 a 300 mm, del cual obtuvieron una resolución de 10 mm.

En esta investigación se desarrolla una metodología para la detección de vacíos y medición de espesores en el concreto. Para el desarrollo de esta metodología se elaboraron 54 vigas y 6 muros de concreto con elementos internos, los cuales representan los vacíos dentro del material.

### **IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN**

Existen varios estudios acerca de detección de vacíos dentro del concreto usando ondas ultrasónicas, sin embargo, los elementos simulados como vacíos en estas investigaciones son muy grandes, los cuales no son típicos en espesores de edificaciones de concreto. Debido a esto, en este estudio se utilizaron esferas de poliestireno expandido de diámetros de 14 a 50 mm y otros elementos pequeños para simular vacíos dentro del concreto.

### **ALCANCES**

Se ha utilizado únicamente mezclas de concreto con una relación agua cemento de 0.6 y 0.7, ya que este es el concreto más utilizado en el Perú y otros países de Latinoamérica. También, se utilizaron solo esferas de poliestireno expandido con diámetros de 14, 25 y 50 mm, ya que son los únicos diámetros disponibles en el mercado local cercanos a la mitad de la longitud de onda de los equipos utilizados.

### **TRABAJO EXPERIMENTAL**

#### **- Propiedades de los materiales**

Se utilizó cemento Portland tipo I acorde con la norma ASTM C150 [15]. El cemento utilizado tiene un peso específico de 3.11, el agregado fino tiene un módulo de finura de 3.03 y un peso específico de 2.62 y el agregado grueso posee un tamaño máximo nominal de 19.05 mm (3/4") y un peso específico de 2.67. Además, se utilizó un aditivo reductor de agua de alto rango para todas las mezclas.

#### **- Especímenes elaborados**

Se elaboraron 48 vigas estándar de 150 x 155 x 520 mm y 6 muros prismáticos de 500 x 500 x 250 mm, acorde con la norma ASTM C192 [16], los cuales fueron almacenados en un cuarto de curado por 28 días (ASTM C511 [17]). En el caso de las vigas, se insertaron esferas de poliestireno expandido de 14, 25 y 50 mm de diámetro con diferente distribución (ver figura 1, 2, 3 y 4). Para el caso de los muros se realizaron tres modelos: el primero contiene un prisma de 300 x 50 x 50 mm de poliestireno expandido, dos esferas huecas de 70 mm de diámetro y una botella de plástico de 50 mm de diámetro y 240 mm de altura; el segundo modelo contiene un cilindro circular hueco de cartón de 75 mm de diámetro y 230 mm de altura, dos cubos de poliestireno expandido de 50 mm y un prisma de 150 x 50 x 50 mm de poliestireno expandido; y el tercer modelo contiene un tubo de PVC de 50 mm (2") y uno de 75 mm (3") de diámetro, como también, una barra de acero corrugado de 25 mm (1") de diámetro (ver figura 5).

Las vigas fueron elaboradas con concreto con relación agua cemento de 0.7 (w/c por sus siglas en inglés) (ver figura 6). En el caso de los muros se elaboraron dos por cada modelo, uno con concreto con relaciones agua cemento 0.6 y el otro con 0.7 (ver figura 7). La medida del slump fue controlada entre 100 y 150 mm (4 y 6") y el contenido de aire entre 1 y 3% en el concreto fresco. Todos los especímenes fueron ensayados con el equipo de ultrasonido y pulso eco ultrasónico a una edad mayor de los 28 días.

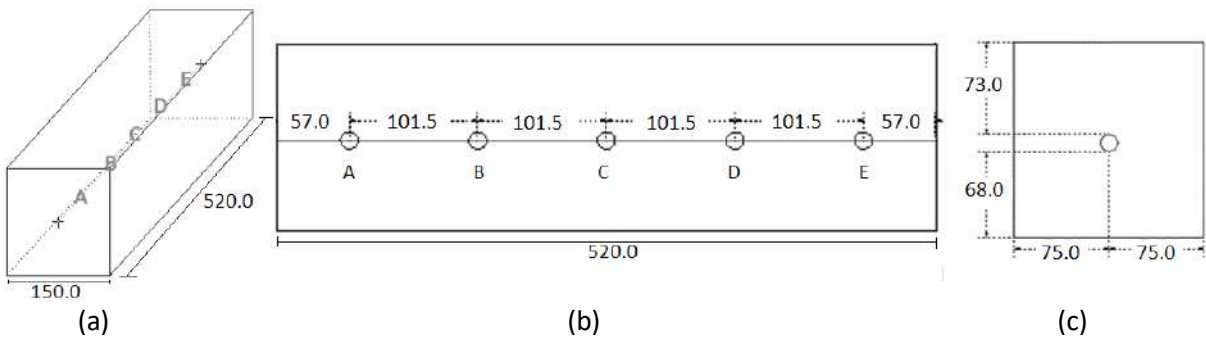


Figura 1. Vigas de 150 x 155 x 520 mm con poliestireno expandido de 14 mm de diámetro  
 (a) Vista 3D (b) Vista lateral (c) Vista transversal (medidas en mm)

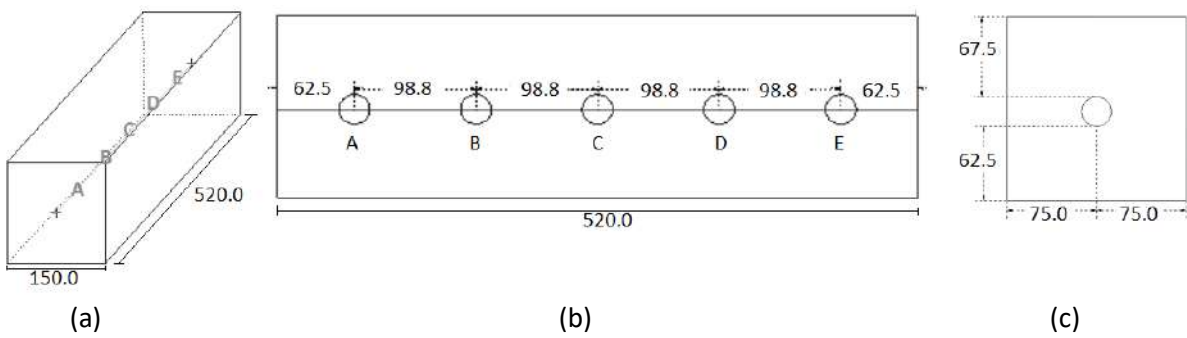


Figura 2. Vigas de 150 x 155 x 520 mm con poliestireno expandido de 25 mm de diámetro  
 (a) Vista 3D (b) Vista lateral (c) Vista transversal (medidas en mm)

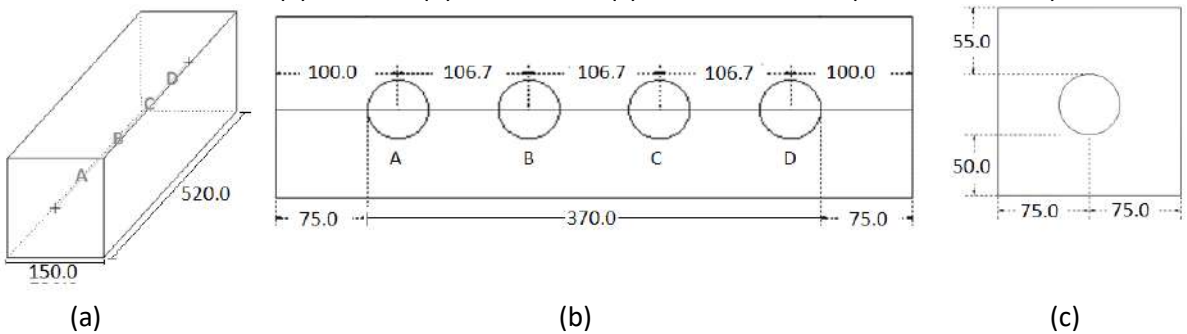


Figura 3. Vigas de 150 x 155 x 520 mm con poliestireno expandido de 50 mm de diámetro  
 (a) Vista 3D (b) Vista lateral (c) Vista transversal (medidas en mm)

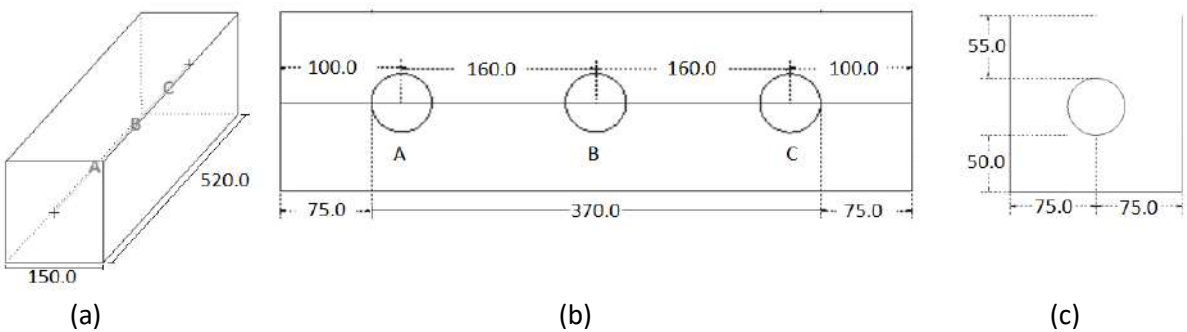


Figura 4. Vigas de 150 x 155 x 520 mm con poliestireno expandido de 50 mm de diámetro  
 (a) Vista 3D (b) Vista lateral (c) Vista transversal (medidas en mm)

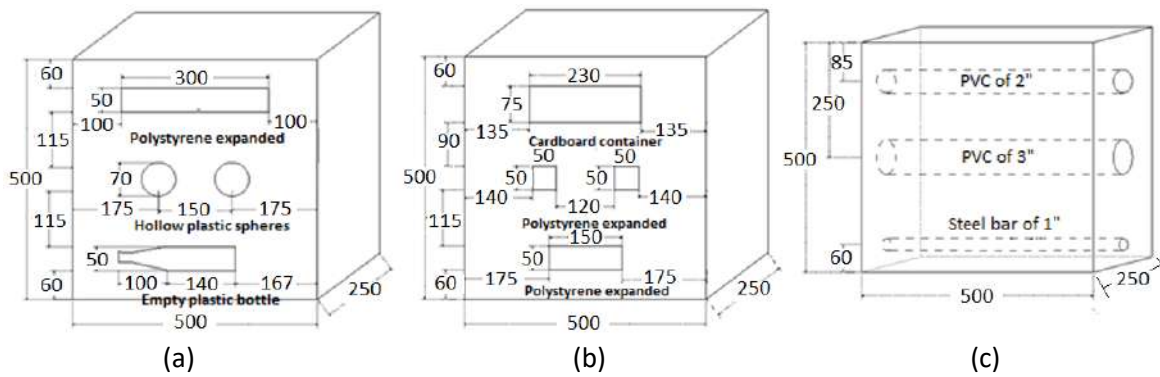


Figura 5. Muros de 500 x 500 x 250 mm  
 (a) modelo 1 (b) modelo 2 (c) modelo 3 (medidas en mm)



Figura 6. Elaboración de las vigas (a) Encofrados (b) Vigas de concreto



Figura 7. Encofrados de los muros (a) modelo 1 (b) modelo 2 (c) modelo 3

### - Equipos

Los equipos de ultrasonido utilizados para la detección de los elementos internos son de la marca Proceq S.A: Pundit PL-200 y PL-200 PE. El Pundit PL-200 es un equipo tradicional de ultrasonido (UPV) con 2 transductores de ondas longitudinales (Onda P) de 54 kHz de frecuencia. Para realizar un escaneo por "transmisión directa" con este equipo es necesario tener acceso a las dos caras opuestas del elemento en análisis. El Pundit PL-200 PE es un equipo pulso eco ultrasónico con 18 transductores de ondas de corte (Onda S) de 50 kHz de frecuencia. Este equipo permite realizar un escaneo de área, en franja, en un elemento. El equipo tiene un ancho de 110 mm, por lo que una franja escaneada posee aproximadamente este mismo ancho. Para realizar un escaneo de área es necesario realizar escaneos parciales sobre la longitud de la franja. La distancia entre dos escaneos parciales es definida por el operador. Tener en cuenta que mientras esta distancia es más pequeña, la calidad del escaneo es mejor. Por otra parte, el ancho de la franja escaneada es promediado en una línea longitudinal central, por lo que el resultado del escaneo de área será el eje longitudinal de la franja versus la profundidad del elemento analizado. Además, cuando se realiza un escaneo de franja de borde a borde, en un elemento, se pierden los 80 mm iniciales y finales de la franja total, ya que el equipo tiene una longitud de 160 mm y los

escaneos siempre se promedian en la parte central del equipo, por lo que es casi improbable encontrar un elemento cerca al borde ya que está fuera del alcance del equipo (véase figura 8). Por último, el equipo permite estimar la velocidad de las ondas en un elemento por medio de sus transductores ya que se conoce la distancia entre emisores y receptores (por medio de ondas superficiales).

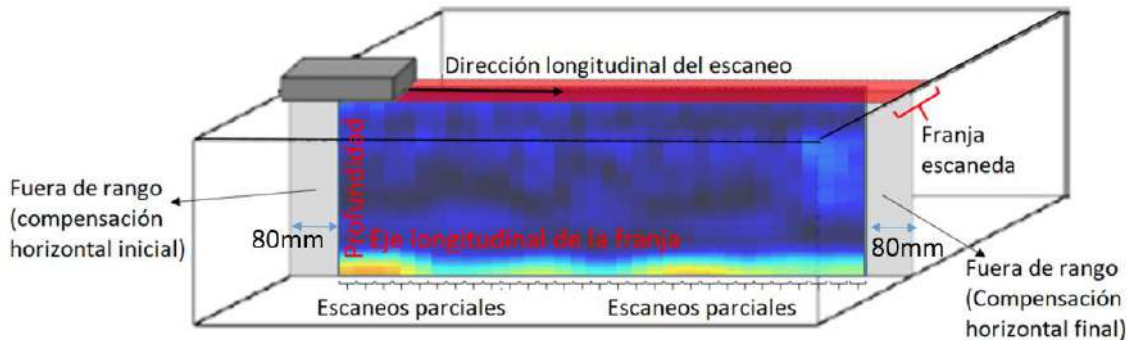


Figura 8. Escaneo con equipo de ultrasonido pulso eco.

**- Tamaño de los vacíos**

Los tamaños de los elementos que simulan los vacíos, fueron elegidos ya que se encuentran muy cerca a la mitad de la longitud de onda de los equipos utilizados. La velocidad de onda de ultrasonido, ondas P, en los elementos elaborados fue de aproximadamente 4000 m/s, por lo que tiene una longitud de onda de 74 mm. Por lo tanto, existe una gran probabilidad de detectar vacíos mayores a los 37mm. Por otra parte, la velocidad de las ondas pulso eco ultrasónicas, ondas S, fue de 2100 m/s aproximadamente, por lo que tienen una longitud de onda de 42mm. Por lo tanto, existe una gran probabilidad de detectar vacíos mayores a los 21mm.

**PROCEDIMIENTO DE ESCANEO**

**- Medición del espesor**

Para medir el espesor de los especímenes de concreto, primero se estimó la velocidad de las ondas ultrasónicas por medio del equipo pulso eco ultrasónico en cada espécimen. Segundo, se emitió las ondas S en el concreto y, por último, se midió el espesor en análisis por medio del tiempo de llegada de las ondas.

**- Detección de los elementos internos**

El método de escaneo con el equipo de ultrasonido, en vigas y muros, fue de “transmisión directa”. Los especímenes de concreto fueron escaneados en zonas donde se encontraban los elementos internos y en zonas donde se conocía que la transmisión de onda era únicamente en concreto sólido (ver figura 9). En el caso de las vigas se escaneo el ancho y la altura, pero en el caso de los muros solo el espesor de 250 mm. Se realizaron alrededor de cinco escaneos en cada elemento interno y cinco escaneos en zonas de concreto sólido, utilizando el procedimiento de escaneo de la norma ASTM C597 [18]. Se consideró la detección de un elemento o vacío cuando la velocidad en la zona del elemento interno era menor a una zona de concreto puro en 2% (tomado como referencia).

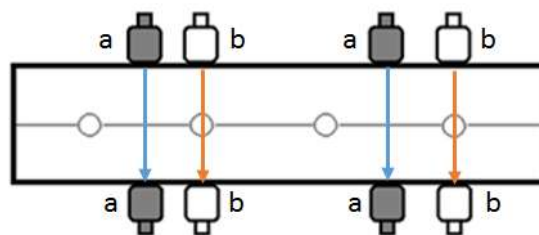


Figura 9. Escaneo por ultrasonido – método directo  
(a) Zona de concreto (b) Zona de elemento interno

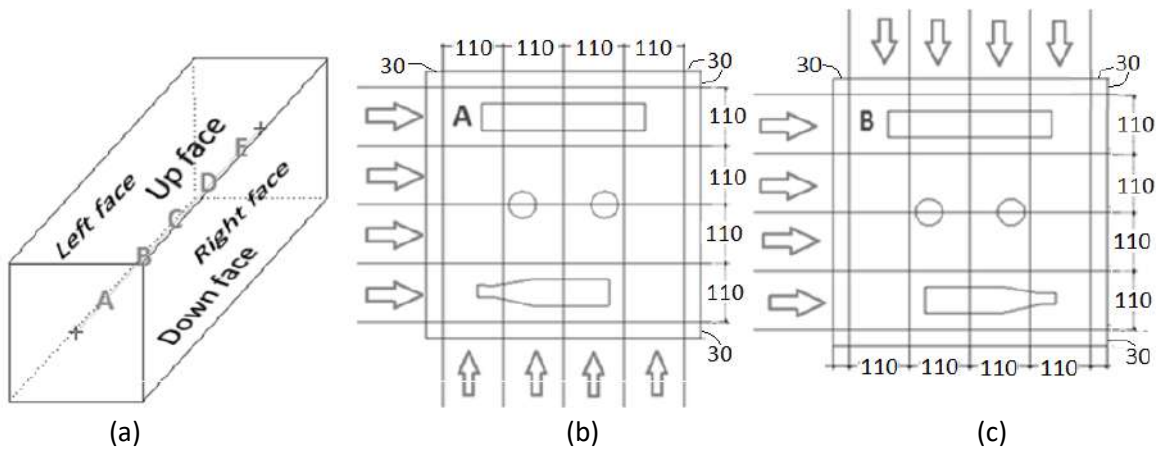


Figura 10. Caras analizadas con el pulso eco ultrasónico

- (a) 4 caras analizadas en vigas
- (b) Direcciones analizadas en la cara A del muro
- (c) Direcciones analizadas en la cara B del muro

Por otro lado, se escanearon las vigas y los muros con el equipo pulso eco ultrasónico de borde a borde. Para obtener mejores resultados, se tomó como longitud de escaneo parcial de 5 mm. En el caso de las vigas, las 4 caras longitudinales fueron escaneadas (en la zona intermedia de la viga) y en el caso de los muros, cada cara de 500 x 500 mm, A y B, fue dividida en 4 franjas horizontales y 4 franjas verticales para el escaneo (ver figura 10).

### RESULTADOS OBTENIDOS

#### - Resistencia a la compresión

Por medio de las probetas cilíndricas, se obtuvo la resistencia a la compresión, del concreto elaborado, conforme a ASTM C39 [19]. Para las relaciones w/c de 0.7 se obtuvo una resistencia a la compresión de 277.3 kg/cm<sup>2</sup> con una desviación estándar de 15.2 kg/cm<sup>2</sup>; y para w/c de 0.6, 357.4 kg/cm<sup>2</sup> con una desviación estándar de 17.0 kg/cm<sup>2</sup>.

#### - Velocidad de Onda P y Onda S

En la tabla 1 se muestra el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación de las ondas P y S en las vigas. En los muros sólo se calculó el promedio de la velocidad de las ondas (la desviación estándar y el coeficiente de variación no fue calculada, ya que la cantidad no era estadísticamente representativa).

Tabla 1. Velocidad de onda ultrasónica

	Ultrasonido – Onda P (54khz)			Pulso eco ultrasónico – Onda S (50khz)		
	Velocidad (m/s)	Desviación estándar (m/s)	Coefficiente de variación (%)	Velocidad (m/s)	Desviación estándar (m/s)	Coefficiente de variación (%)
48 vigas (w/c=0.7)	4051	58	1.91	2232	46	2.08
3 muros (w/c=0.7)	4153	-	-	2177	-	-
3 muros (w/c=0.6)	4267	-	-	2165	-	-

#### - Medición del espesor por medio del pulso eco ultrasónico

En las 48 vigas se midió el espesor en las dimensiones de 150 mm y 155 mm, y en los muros, la dimensión de 250 mm, con una precisión de 1 mm (ver figura 11). La velocidad de la onda S fue estimada en cada muestra para así obtener el espesor del elemento en cada escaneo. Se tomó el espesor escaneado en el pico de la primera amplitud máxima inicial como referencia. En la tabla 2 se muestra el error obtenido en promedio y la desviación estándar en porcentaje de todos los escaneos al comparar el espesor escaneado frente a su espesor real medido con un pie de rey.

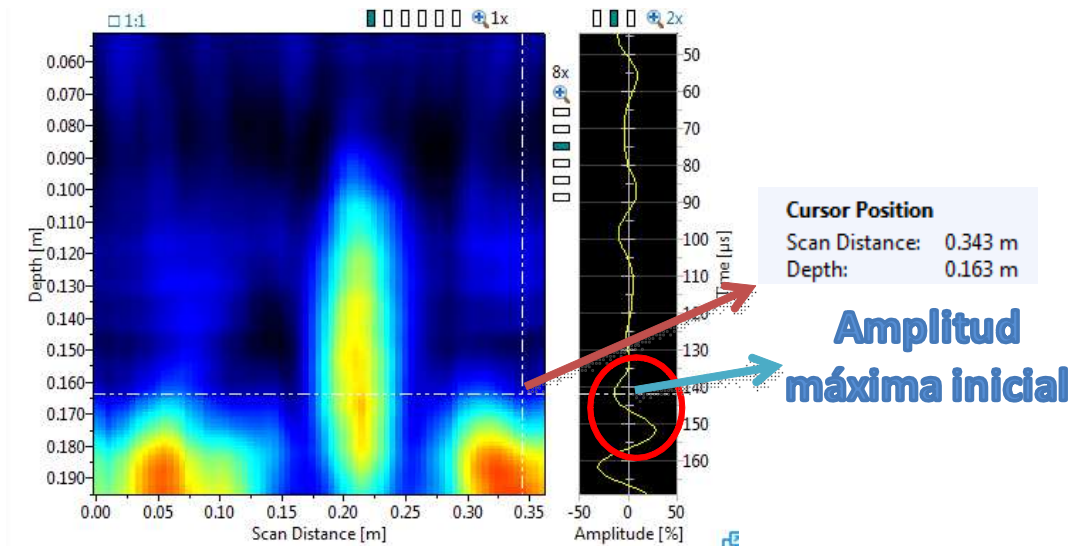


Figura 11. Escaneo del espesor del concreto en viga de espesor 150 mm

Tabla 2. Medición de espesores

	Vigas (192 datos) (w/c = 0.7)	Muros (44 datos) (w/c = 0.7)	Muros (44 datos) (w/c = 0.6)
Error promedio encontrado (%)	3.91	-3.90	-5.80
Desviación estándar (%)	3.69	2.60	3.21

#### - Elementos internos encontrados con el ultrasonido (54 KHz onda P)

La mitad de la longitud de onda P es aproximadamente 37 mm para una velocidad de 4000 m/s (UPV), sin embargo, en la tabla 3 se muestra que se pudo detectar algunas esferas de poliestireno expandido de 25 y 50 mm de diámetro. También, en esta tabla se muestra la probabilidad de detectar estas esferas.

Tabla 3. Esferas detectadas con el pulso ultrasónico (UPV) - vigas

Diámetro de las esferas (mm)	Esferas detectadas	Esferas no detectadas	Probabilidad de detección (%)
14	0	36	0.00
25	3	33	8.33
50	20	4	83.33

Por otro lado, en el caso de los muros, los elementos internos eran de mayor tamaño por lo que la mayoría fue detectada. Algunos cubos de poliestireno expandido y las barras de acero no fueron detectados (ver tabla 4).

Tabla 4. Elementos detectados con el pulso ultrasónico (UPV) - muros

	Encontrados	No encontrados
Barra de poliestireno (50 x 50 x 300 mm)	6	0
Esfera de plástico (φ70 mm)	1	3
Botella de plástico (240 mm x φ50 mm)	4	0
Barra circular hueca de cartón (230 mm x φ70 mm)	6	0
Cubo de poliestireno (50 mm)	2	4
Barra de poliestireno (50 x 50 x 150 mm)	5	1
Tubo de PVC (φ2")	6	0
Tubo de PVC (φ3")	6	0
Barra de acero (φ1")	0	6

**- Elementos internos encontrados con el pulso eco ultrasónico (50 KHz onda S)**

En este caso, ya que se utilizaron ondas S, la velocidad de propagación de las ondas era más lenta en el concreto. La mitad de la longitud de onda S es aproximadamente 21 mm para una velocidad de 2100 m/s, por lo que se pudo localizar vacíos de menor tamaño en las vigas, las cuales no eran percibidos por las ondas P del equipo de ultrasonido (véase tabla 5). Todas las vigas fueron cortadas a la mitad longitudinalmente para medir el error entre la posición inicial y la posición escaneada de cada elemento interno. El error máximo longitudinal encontrado fue de 43 mm.

Tabla 5. Esferas detectadas con el pulso eco ultrasónico - vigas

Diámetro de las esferas (mm)	Esferas encontradas	Esferas no encontradas	Probabilidad de detección (%)
14	22	176	<b>11.11</b>
25	118	80	<b>59.60</b>
50	112	24	<b>82.35</b>

En el caso de los muros se pudo ubicar la mayoría de los elementos internos, sin embargo, en los escaneos no se aprecia la longitud completa de algunos elementos largos (ver figura 12 y tabla 6). Por otro lado, las barras de acero estuvieron muy cerca del borde, por lo que estuvieron fuera del alcance del equipo pulso eco ultrasónico (ver figura 13).

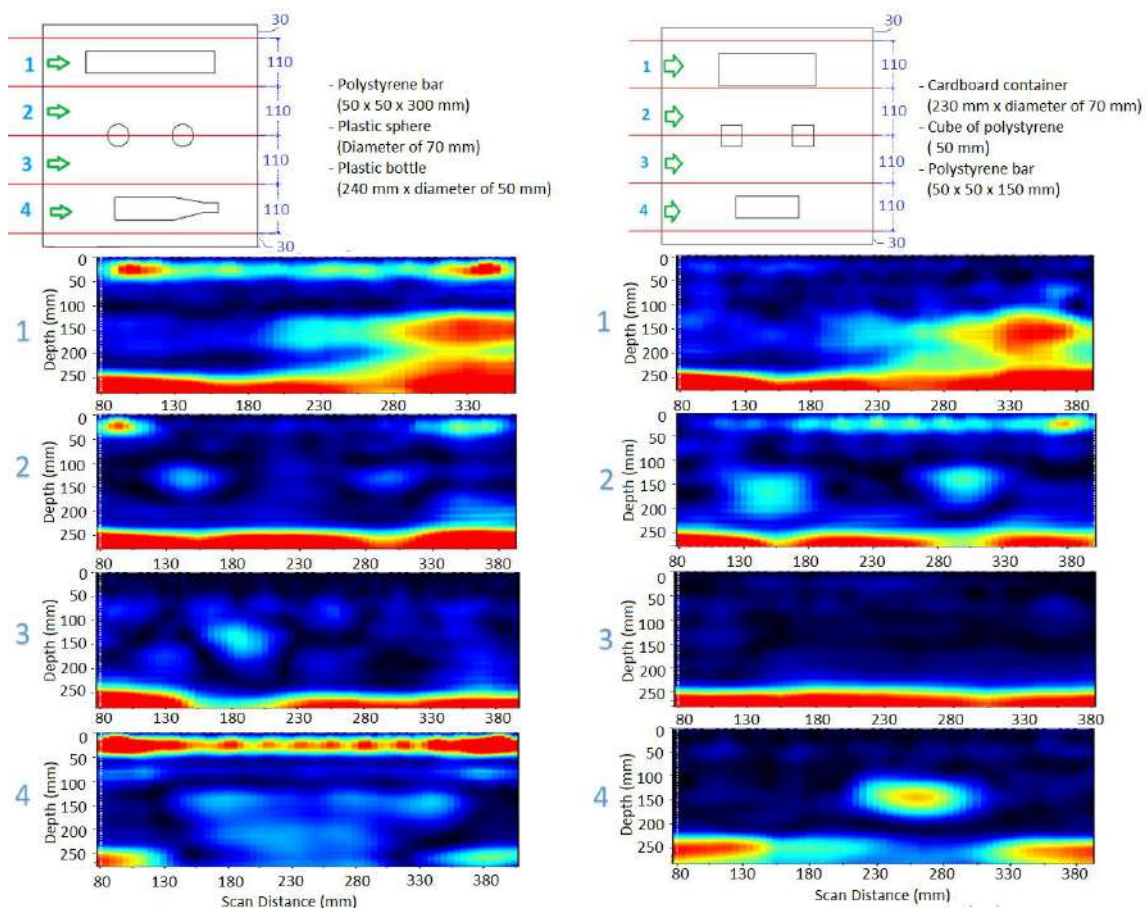


Figura 12. Escaneos usando el equipo pulso eco ultrasónico en muros modelo 1 y 2.



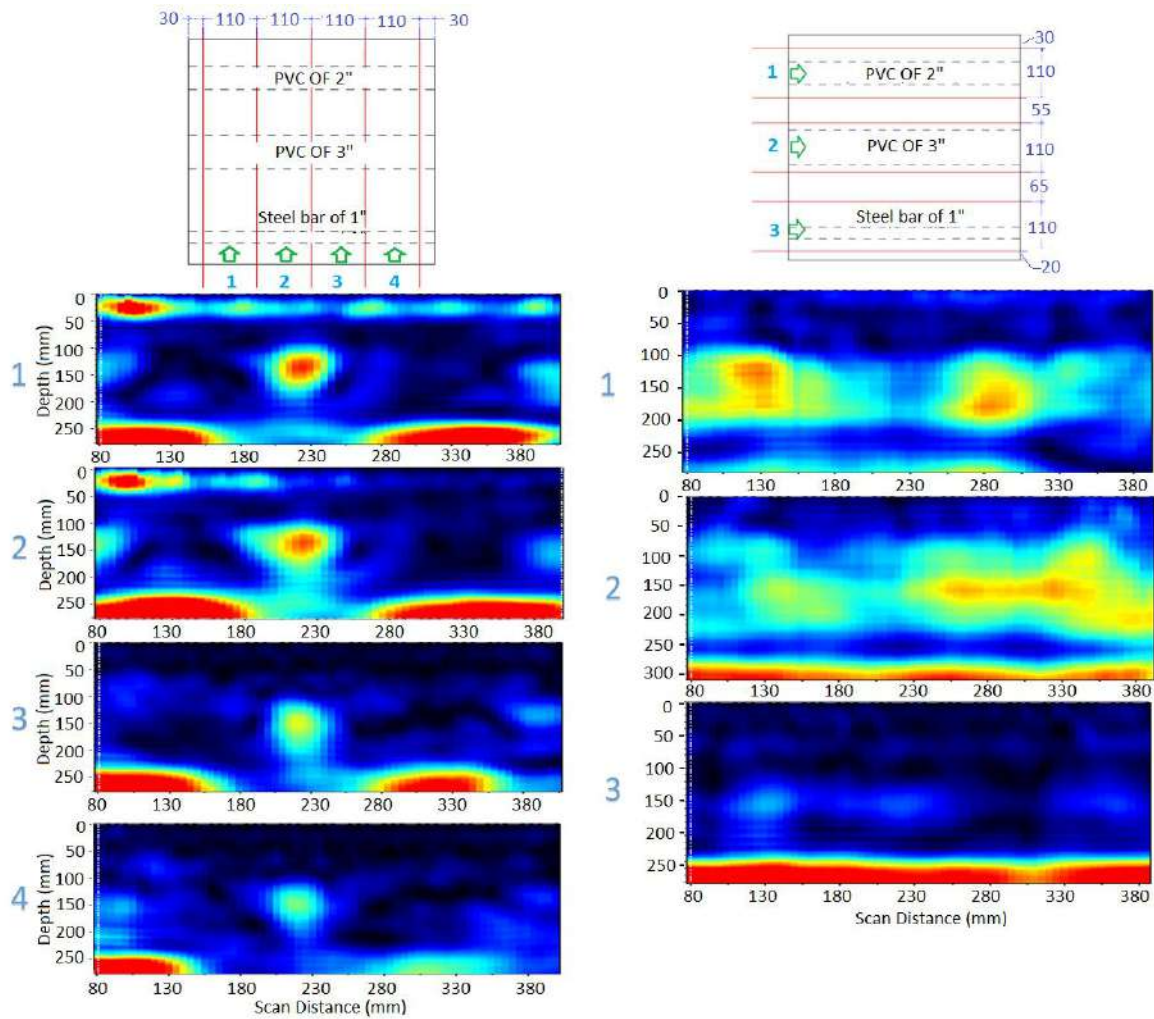


Figura 13. Escaneos realizados usando el equipo pulso eco ultrasónico en muros modelo 3.

Table 6. Elementos encontrados con el pulso eco ultrasónico – muros

	Encontrados	No encontrados	Comentarios
Barra de poliestireno (50 x 50 x 300 mm)	4	0	Dos de los cuales no fueron ubicados en toda su longitud (50% no visible).
Esferas de plástico (φ70 mm)	10	0	Todas las esferas fueron ubicadas.
Botella de plástico (240 mm x φ50 mm)	4	1	No se pudo encontrar la botella en una de las caras del concreto.
Barra circular hueca de cartón (230 mm x φ70 mm)	10	0	Todos los elementos fueron ubicados.
Cubos de poliestireno (50 mm)	7	3	No fue posible encontrar los cubos en un muro de concreto.
Barra de poliestireno (50 x 50 x 150 mm)	4	0	Todas las barras fueron ubicadas.
PVC (φ2")	4	0	El tubo de PVC fue ubicado.
PVC (φ3")	4	0	El tubo de PVC fue ubicado.
Barra de acero (φ1")	-	-	Fuera del alcance del equipo.

**- Máximo error encontrado en la ubicación de un vacío (50 KHz – S wave)**

En la tabla 7 se muestra el máximo error encontrado longitudinalmente y en profundidad al ubicar vacíos en una franja escaneada.

Table 7. Máximo error encontrado al detectar vacíos

	Error máximo encontrado - longitudinalmente (mm)	Error máximo encontrado – profundidad (mm)
Esferas de poliestireno – 14 mm	43	(*)
Esferas de poliestireno – 25 mm	40	(*)
Esferas de poliestireno – 50 mm	33	(*)
Barra de poliestireno (50 x 50 x 300 mm)	(**)	23
Barra de poliestireno (50 x 50 x 150 mm)	(**)	13
Barra circular hueca de cartón (230 mm x $\phi$ 70 mm)	(**)	20
Botella de plástico (240 mm x $\phi$ 50 mm)	(**)	20
Cubos de poliestireno (50 mm)	35	37
Esferas de plástico ( $\phi$ 70 mm)	33	44
PVC ( $\phi$ 2")	31	24
PVC ( $\phi$ 3")	5	23

(\*) En las vigas se obtuvo mucho error en la medida de la profundidad de las esferas, ya que las ondas de ultrasonido rebotaron muchas veces en las caras laterales (el ancho tenía casi de la misma medida que la profundidad), lo que hizo que los resultados sean inexactos.

(\*\*) En los muros, la longitud de algunos elementos largos no fue ubicada en su totalidad (escaneos horizontales). Además, cuando se realizaron escaneos verticales, algunos elementos se encontraban muy cerca del borde, por lo que estuvieron fuera del alcance del equipo.

### METODOLOGÍA

A partir de los resultados obtenidos, es recomendable realizar escaneos en concreto armado por medio del siguiente procedimiento. En primer lugar, es necesario utilizar un detector de metales con el fin de ubicar la posición de las barras de aceros longitudinales y verticales en la zona de análisis. En segundo lugar, se debe obtener la velocidad de la onda transversal en el material por medio del grosor del elemento, si es que este es conocido, o sino estimarlo por medio de los transductores. Por último, escanear el elemento por medio del equipo pulso eco ultrasónico en franjas longitudinales.

En el caso de encontrar una anomalía en el escaneo de área (vacío, cangrejera, elemento interno), verificar con el detector de metales de que este no se trate de una barra de acero. Si se tiene acceso a las dos caras opuestas del elemento, se debe escanear la zona en controversia con un equipo de ultrasonido (método directo). Para ello, se debe marcar la ubicación exacta de la anomalía, para luego realizar escaneos en un radio de 50 mm del punto en controversia. La variación del tiempo de transferencia en la zona de controversia frente a zonas de concreto sólido indicará si existe algún vacío o elemento en el interior del material analizado. Si no se tiene acceso a la cara opuesta, se debe realizar un escaneo con el equipo pulso eco ultrasónico en una franja perpendicular a la franja analizada en la zona de la anomalía.

Por otra parte, para estimar el espesor de un elemento de concreto, antes se debe estimar la velocidad de onda del pulso eco ultrasónico en el material. En el caso de que no se detecten elementos internos o vacíos en el interior, el espesor del elemento se estimará con un error de 6% y una desviación estándar de 4% del espesor real. Tener en cuenta de que si se encuentran vacíos el valor obtenido no será confiable.

### CONCLUSIONES

Ambos equipos independientemente nos dan una alta confiabilidad, mayor de 80%, en encontrar un elemento o vacío dentro del concreto cuando este tiene un tamaño mayor a 50 mm, por lo que, si los elementos internos son de mayor tamaño, la probabilidad de detección es mayor. Por otra parte, usar únicamente un equipo de ultrasonido convencional de onda P no es eficiente para detectar vacíos, ya que se tomaría mucho tiempo en escanear un elemento de concreto cada cierto punto en pequeñas distancias, y, además, es necesario tener acceso a las dos caras opuestas de dicho elemento. Sin embargo, con el equipo pulso eco ultrasónico se pueden escanear grandes áreas y así encontrar vacíos o elementos dentro del concreto, pero, no se tiene una muy buena precisión en la localización exacta de estos, como sucedió en el caso de los especímenes elaborados, el máximo error longitudinal encontrado fue de 43 mm al ubicar un elemento interno. También, las barras de acero dentro del concreto son detectadas y aparecieron en los escaneos de área realizados en los muros.

Por otra parte, con el equipo pulso eco ultrasónico se pudo determinar el espesor de un elemento de concreto con un error promedio de 3.91% en las vigas y 5.80% en los muros. De lo mencionado anteriormente se concluye que el error promedio al medir el espesor, con un equipo pulso eco ultrasónico, de un elemento de concreto de 150 a 250 mm puede ser de 5.81% con una desviación estándar de 3.69% de la medida real. Tener en cuenta que la precisión no es exacta, ya que la velocidad de onda se ha estimado por medio de las ondas superficiales, pero a pesar de esto, la estimación del espesor es muy cercana al valor real. También, tener en cuenta que este equipo puede ser utilizado no solo para medir elementos de concreto, sino también elementos de asfalto, madera, acero, entre otros.

Por último, considerar que estos ensayos no destructivos no son completamente eficaces, por lo que en un elemento de concreto pueden existir vacíos internos y el equipo puede no detectarlos. Para tener una completa seguridad es necesario retirar núcleos diamantinos del elemento en controversia.

### AGRADECIMIENTOS

Todos los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú. También se tuvo el apoyo de las empresas de UNICON, Unacem, Concretemix y Química Suiza con donaciones de agregados, cemento y aditivos respectivamente.

### REFERENCIAS

1. Carino, N. J., and Sansalone, M., "Pulse-Echo Method for Flaw Detection in Concrete," Final Report, Center for Building Technology, National Bureau of Standards, Washington, DC, 1984.
2. Hoła, J., and Schabowicz, K., "State-of-the-Art Nondestructive Methods for Diagnostic Testing of Building Structures – Anticipated Development Trends," Archives of Civil and Mechanical Engineering, V. 10, V. 3, 2010, pp. 5-18.
3. ACI Committee 228, "Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures (ACI 228.2R-13)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2013, 82 pp.
4. Malhotra, V. M., and Carino, N. J., Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, second edition, CRC Press, Boca Raton, FL, 2004, 384 pp.
5. Martin, T., "Ultrasonic Testing on EUROFER Welded Joints for Determination of the Minimum Detectable Flaw Size," KIT Scientific Reports 7543, 2010, pp. 1-2.
6. Haach, V. G., and Ramirez, F. C., "Qualitative Assessment of Concrete by Ultrasound Tomography," Construction and Building Materials, V. 119, 2016, pp. 61-70. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.056.
7. Carino, N. J., "Laboratory Study of Flaw Detection in Concrete by the Pulse-Echo Method," In-Situ/Nondestructive Testing of Concrete, SP-82, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1984, pp. 557-580.
8. Doctor, S. R.; Hall, T. E.; and Reid, L. D., "SAFT — The Evolution of a Signal Processing Technology for Ultrasonic Testing," NDT&E International, V. 19, No. 3, 1986, pp. 163-167. doi: 10.1016/0308-9126(86)90105-7
9. Shandiz, H. T., and Gaydecki, P. A., "An Enhanced, High-Speed Ultrasonic SAFT System for Imaging of Defects within Concrete Structures," AIP Conference Proceedings, V. 557, No.1, 2001, pp. 703-709.
10. Hosseini, Z.; Momayez, M.; Hassani, F.; and Lévesque, D., "Detection of Inclined Cracks inside Concrete Structures by Ultrasonic SAFT," AIP Conference Proceedings, V. 975, No. 1, 2008, pp. 1298-1304.
11. Tong, J. H.; Chiu, C. L.; and Wang, C. Y., "Improved Synthetic Aperture Focusing Technique by Hilbert-Huang Transform for Imaging Defects inside a Concrete Structure," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, V. 57, No. 11, 2010, pp. 2512-2521.
12. Cassidy, N. J.; Eddies, R.; and Dods, S., "Void Detection beneath Reinforced Concrete Sections: The Practical Application of Ground Penetrating Radar and Ultrasonic Techniques," Journal of Applied Geophysics, V. 74, No. 4, 2011, pp. 263-276. doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.06.003..
13. De La Haza, A. O.; Samokrutov, A. A.; and Samokrutov, P. A., "Assessment of Concrete Structures Using the Mira and Eyecon Ultrasonic Shear Wave Devices and the SAFT-C Image Reconstruction Technique," Construction and Building Materials, V. 38, 2013, pp. 1276-1291. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.002.

14. Beutel, R.; Reinhardt, H. W.; Grosse, C. U.; Glaubitt, A.; Krause, M.; Maierhofer, C.; Algernon, D.; Wiggerhauser, H.; and Schickert, M., "Comparative Performance Tests and Validation of NDT Methods for Concrete Testing," *Journal of Nondestructive Evaluation*, V. 27, No. 1-3, 2008, pp. 59-65. doi: 10.1007/s10921-008-0037-1.
15. ASTM C150/C150M-16e1, "Standard Specification for Portland Cement," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, 10 pp.
16. ASTM C192/C192M-16a, "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, 8 pp.
17. ASTM C511-13, "Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, 3 pp.
18. ASTM C597-16, "Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, 4 pp.
19. ASTM C39/C39M-17b, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, 8 pp.